TRANSFERENCIA DE CALOR

MI31A-Fenómenos de Transporte en Metalurgia Extractiva

Prof. Tanai Marín

Clase #8

Transferencia de calor por convección

- Hasta ahora hemos discutido el fenómeno de transferencia de calor por conducción en régimen permanente y transiente.

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \nabla^2 T$$

- La transferencia de calor por convección, la hemos introducido como condición de borde en el caso de superficies sólidas en contacto con un fluido en movimiento:

$$q = h\left(T_S - T_\infty\right)$$

Transferencia de calor por convección

- El coeficiente de transferencia de calor, h, es una aproximación que “resume” o “represneta” las condiciones reales de flujo, sus propiedades y la geometría del sistema.
- El coeficiente de transferencia de calor, no necesariamente es constante en el tiempo y posición y se necesitan correlaciones adecuadas para obtener una idea de su valor.

Transferencia de calor por convección

- La naturaleza de la transferencia de calor por convección tiene que ver con el hecho de que el fluido o el medio está en movimiento.
- En el caso general, la velocidad del fluido será función de la posición, del tiempo y eventualmente, de otras variables como temperatura y concentración

- Siempre que un objeto esté a una temperatura distinta que su ambiente, habrá transferencia de calor por convección.
- La ecuación que describe este fenómeno s deriva de la conservación de energía para una masa de control:

- Si $\phi = T$, entonces la energía está dada por:

$$\Phi = \int_{\Omega_{CM}} \rho c_p T \mathrm{d}\Omega$$

- y la conservación de Φ, según el teorema del transporte de Reynolds:

$$\frac{D}{Dt}\int_{\Omega_{CM}} \rho c_p \mathrm{Td}\Omega = \frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega_{CV}} \rho c_p T d\Omega + \int_{S_{CV}} \rho c_p T \mathbf{u}\cdot\mathbf{n} dS = 0$$

- Aplicando el teorema de divergencia de Gauss, se obtiene la forma diferenecial:

- Aplicando el teorema de divergencia de Gauss al termino convectivo y permitiendo que el volumen de control se infenitesimalmente pequeño, se obtiene la forma diferencial para la conservación de energía:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\nabla \cdot \rho c_p T \overline{\mathbf{u}}\right) = 0$$

- Además, sabemos que en la ausencia de movimiento, la ecuación que describe la transferencia de calor por conducción es:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T$$

- Al combinar estas dos ecuaciones, obtenemos la ecuación general que describe el balance de energía en presencia de transporte de calor convevtivo y conductivo:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\nabla \cdot \rho c_p T \bar{\mathbf{u}}\right) = k \nabla^2 T$$

- En la ecuación anterior, ambos fenómenos están incluidos y es necesario conocer el campo de velocidades del fluido para resolverla.
- Una forma de relacionar los efectos de ambos fenómenos es a través del número de Prandtl:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\text{transporte viscoso}}{\text{transporte de calor}} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{k}{c_p \rho}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k}$$

- Cuando el número de *Prandtl* es igual a 1, las capas límite térmica (δ_T) y viscosa (δ, o hidrodinámica) se sobreponen. Para la mayoría de los líquidos, Pr está entre 3 a 100, por lo que δ_T es más delgada que d.
- En el caso de metales líquidos, Pr puede ser menor a 0.1 y δ_T es más gruesa que δ.

Propiedades de varios fluidos

Fluido	ρ(kg/m^3)	μ(Pa s)	c_p(J/kg K)	k(W/mK)	Pr
Mercurio	13593	1.5×10^{-3}	139	8.3	0.025
Aire	1.2	1.81×10^{-5}	1007	0.025	0.72
Agua	990	1.0×10^{-3}	4189	0.62	6.76
Alcohol	795	1.2×10^{-3}	2395	0.168	17
Glicerina	1260	1.49	2386	0.287	12400
Sales Fundidas	2000	2.0×10^{-3}	1500	0.4	7.5
Metales líquidos	2000 - 8000	2.0×10^{-3}	300 - 1000	30 – 130	0.015
Matas Líquidas	4800	2.0×10^{-3}	500	2	0.5
Escorias líquidas	3800	0.4 - 10	800 - 1300	1	1000

Transferencia de calor para flujo laminar sobre una placa plana

- Para flujos laminares de fluidos con $0.6 < Pr < 50$ sobre una placa, isotérmica, el coeficiente de transferencia de calor local está dado por:

$$h(x) = 0.332 \cdot k \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu \cdot x}}$$

- Donde u_∞ es la velocidad del seno del fluido, x es la distancia desde el borde de la placa, ν es la viscosidad cinemática (μ/ρ)

- Para flujo laminar de aire o agua sobre una placa plana a 1 atm y temperatura ambiente, se pueden utilizar las siguientes aproximaciones:
  - Aire: $$h(x) = 1.95\sqrt{\frac{u_{\infty,aire}}{x}}$$
  - Agua: $$h(x) = 400\sqrt{\frac{u_{\infty,agua}}{x}}$$
- Bajo las mismas condiciones, el coeficiente de transferencia de calor es 200 veces mayor para agua que para aire

- El coeficiente de transferencia de calor promedio desde el borde de la placa hasta una posición a x=L está dado por:

$$h_{ave} = \frac{1}{L}\int_0^L h(x)dx = 0.664 \cdot k \cdot \Pr^{1/3} \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu \cdot L}}$$

Número de Nusselt

- El número de Nusselt (Nu) representa el gradiente adimensional de temperatura sobre la superficie:

$$Nu = \frac{\text{transporte convectivo}}{\text{transporte conductivo}} = \frac{h \cdot x}{k}$$

- El número de Nusselt puede relacionar el coeficiente de transferencia de calor con otros números adimensionales.

Convección Forzada

- En este caso, el movimiento del fluido es causado por factores externos.
  - Flujo en una cañería
  - Flujo de aire debido a un ventilador
  - Flujo en un estanque debido a un agitador
- En convección forzada, es importante conocer el número de Reynolds, para conocer si el flujo es laminar o turbulento.
- En convección forzada, el número de Nusselt es una función del número de Reynolds y de Prandtl

Convección forzada

- En el caso de una placa isotérmica:

$$Nu(x) = \frac{\left(0.332 \cdot k \cdot \Pr^{1/3} \sqrt{\dfrac{u_\infty}{\nu \cdot x}}\right) \cdot x}{k} = 0.332 \cdot \Pr^{1/3} \cdot \mathrm{Re}_x^{1/2}$$

- En el caso de flujo de calor constante desde la placa:

$$Nu(x) = 0.453 \cdot \Pr^{1/3} \cdot \mathrm{Re}_x^{1/2}$$

$$\mathrm{Re}_x = \frac{x \cdot u \cdot \rho}{\mu}$$

Convección Forzada

Situación	Condición	$Nu=hD/k$ $Nu=hL/k$ $Nu_x=hx/k$
Cañería; Laminar Re = $Du\rho/\mu$ < 2100	q = constante T_S = constante	4.36 3.66
Cañeria, ductos no circulares; Turbulento, Re > 4100	$T_S > T_{fluido}$ $T_S < T_{fluido}$	$0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ $0.023Re^{0.8}Pr^{0.3}$
Placa plana; Laminar (Re < $3x10^5$)	isoT; 0.6<Pr<50 q = constante	$0.332Re_x^{0.5}Pr^{1/3}$ $0.453Re_x^{0.5}Pr^{1/3}$
Placa plana; Turbulento ($5x10^5$< Re < 10^8)	isoT; 0.6<Pr<50 q = constante	$0.0296Re_x^{0.8}Pr^{1/3}$ $0.0308Re_x^{0.8}Pr^{1/3}$

Errores producto de estas aproximaciones pueden llegar a ser de 25%

- Además, se entrega la siguiente correlación que puede aplicarse a un rango amplio de números de Pr

$$Nu(x) = \frac{0.3387 \cdot \Pr^{1/3} \cdot \mathrm{Re}_x^{1/2}}{\left[1 + \left(\frac{0.0468}{\Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}; \quad \Pr \cdot \mathrm{Re} > 100$$

- Para ductos rectangulares y flujo laminar las siguientes correlaciones pueden ser usadas:
  - Flujo de calor constante $Nu = 3.0 + 0.58\dfrac{W}{H}$
  - Temperatura constante $Nu = 2.6 + 0.43\dfrac{W}{H}$

Con Nu: $$Nu = \frac{hD_e}{k} = \frac{h\dfrac{2HW}{H+W}}{k}$$

y razones de W/H entre 1 y 4. W=ancho y H=alto del ducto

Metales líquidos

- Las correlaciones desarrolladas para fluidos a baja temperatura no pueden aplicarse a metales líquidos.
- Los metales líquidos, tienden a tener muy bajos números de Pr.

Metales líquidos

- Para flujo en cañerias con flujo de calor constante se propone la siguiente ecuación:

$$Nu = 4.82 + 0.0185 \cdot (\mathrm{Pr} \cdot \mathrm{Re})^{0.827}$$

- Esta correlación es válida para $\mathrm{Re} < 10^6$ y $100 < \mathrm{PrRe} < 10000$

Metales líquidos

- Para flujo en cañerías con temperatura constante se propone la siguiente ecuación:

$$Nu = 5.0 + 0.025 \cdot (\Pr \cdot \mathrm{Re})^{0.8}$$

- Esta correlación es válida para $\mathrm{Re} < 10^6$ y $100 < \mathrm{PrRe}$ y $L/D > 60$

Flujo forzado a través de cilindros y esferas

- El coeficiente de transferencia de calor global para flujos a través de un cilindro o alambre puede estimarse en base a:

$$Nu(x) = 0.3 + \frac{0.62 \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \mathrm{Re}^{1/2}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{\mathrm{Pr}}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mathrm{Re}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

- Válido entre $10^2 < \mathrm{Re} < 10^7$ y $\mathrm{RePr} > 0.2$

- Para esferas cayendo libremente a través de un fluido, la correlación de Ranz-Marshal es comúnmente usada:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 2 + \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \mathrm{Re}^{1/2}$$